

**И. Г. Фархатдинов**, аспирант,

**Ю. В. Подураев**,

д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой,

МГТУ "СТАНКИН",

**Дж.-Х. Ю**, проф.,

директор лаборатории "БиоРобототехники",

Корейский университет технологии

и образования, Южная Корея

ildar.info@gmail.com

## Экспериментальное исследование позиционного, скоростного и комбинированного позиционно-скоростного режимов управления в системах дистанционного управления мобильными роботами

*Описаны результаты экспериментального исследования позиционного, скоростного и комбинированного позиционно-скоростного режимов дистанционного управления мобильными роботами. Приводятся результаты сравнительного анализа качества систем дистанционного управления при позиционном, скоростном и комбинированном режимах. Также изучено влияние типа человеко-машинного интерфейса и способов представления информации человеку-оператору на качество дистанционного управления. Представлены результаты двух экспериментов: позиционирование мобильного робота и управление мобильным роботом в среде с большим числом препятствий.*

**Ключевые слова:** дистанционное управление, мобильный робот, человеко-машинный интерфейс

### Введение

Системы дистанционного управления (ДУ) роботами широко применяются в современном машиностроении, энергетике, науке, медицине, космонавтике. В таких системах человек-оператор (ЧО) управляет роботом, находящимся в удаленной среде, с помощью задающего устройства (ЗУ) [1]. В последнее время активно применяется ДУ мобильными роботами (МР). Известно множество публикаций, посвященных системам ДУ МР [2–5]. Однако в указанных исследованиях большое внимание уделяется разработке и исследованию человеко-машинных интерфейсов (ЧМИ), основанных на системах отражения усилия и системах технического зрения, и практически не изучены вопросы влияния ЧМИ и режимов ДУ МР на качество выполняемых задач. В большинстве предыдущих исследований для ДУ МР использовался скоростной режим управления, который является традиционным для подобных систем. В данной статье авторы проводят

качественный анализ влияния различных режимов управления и ЧМИ на производительность и точность системы. Предложен комбинированный позиционно-скоростной режим ДУ МР, и при различных типах ЧМИ экспериментально исследовано влияние позиционного, скоростного и комбинированного режимов на качество работ, выполняемых при ДУ МР.

### 1. Краткое описание системы ДУ МР

Рассматривается система ДУ колесным МР. ЧО управляет МР посредством изменения положения ЗУ. Управляющие сигналы передаются на контроллер МР по каналам беспроводной связи. На рис. 1 показаны конфигурации ЗУ (а) и МР (б). Управляющие сигналы формируются на основании измеренного положения ЗУ ( $x_m, z_m$ ). На рис. 1, б,  $V$  — скорость МР;  $\phi$  — угол поворота, отчитываемый от оси фиксированной системы координат (СК);  $S$  — путь, пройденный роботом. На МР помимо датчиков положения на приводах колес могут быть также установлены системы измерения расстояния от корпуса робота до объектов, окружающих робот. Примером таких систем могут служить датчики расстояния с инфракрасными излучателями и приемниками или лазерные сканеры. Расстояние до препятствий, измеренное датчиками, пересылается на пульт управления и отображается ЧО посредством воспроизведения усилия на активном ЗУ. В рассматриваемой системе ДУ МР также предполагается наличие видеокамер и мониторов, которые позволяют ЧО получать видеосигналы из удаленной среды.

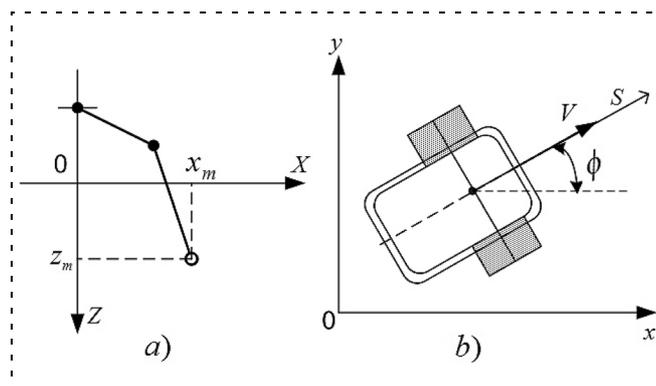


Рис. 1. Схема задающего устройства и мобильного робота при ДУ (вид сверху)

### 2. Режимы управления

#### 2.1. Скоростное и позиционное управление

В системах ДУ МР в большинстве случаев используется режим управления по скорости [2, 3]. В данном режиме управления положение ЗУ определяет

желаемую скорость МР. Такой режим управления кратко описывается следующим уравнением:

$$\begin{pmatrix} V \\ \dot{\phi} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} k_V & 0 \\ 0 & k_\omega \end{pmatrix} \begin{pmatrix} q_1 \\ q_2 \end{pmatrix}, \quad (1)$$

где  $q_1, q_2$  определяют положение ЗУ;  $k_V$  и  $k_\omega$  — коэффициенты масштабирования;  $q_1, q_2$  определяют положение ЗУ с учетом искусственно введенной мертвой зоны:

$$q_1 = \begin{cases} -z_m, & |z_m| > z_{dz}; \\ 0, & |z_m| \leq z_{dz}; \end{cases} \quad (2)$$

$$q_2 = \begin{cases} x_m, & |x_m| > x_{dz}; \\ 0, & |x_m| \leq x_{dz}. \end{cases} \quad (3)$$

Размеры мертвой зоны задаются величинами  $z_{dz}$  и  $x_{dz}$ . Мертвая зона вводится в систему ДУ для повышения безопасности.

Позиционный режим управления описывается следующим уравнением:

$$\begin{pmatrix} S \\ \phi \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} k_S & 0 \\ 0 & k_A \end{pmatrix} \begin{pmatrix} q_1 \\ q_2 \end{pmatrix}, \quad (4)$$

где  $k_S$  и  $k_A$  — коэффициенты масштабирования. Подобная стратегия управления применяется в ДУ роботами-манипуляторами [1] и не характерна для ДУ МР. Это обусловлено трудностями при согласовании ограниченной рабочей зоны ЗУ с практически неограниченной рабочей зоной МР. При этом позиционное управление по сравнению со скоростным управлением позволяет четко задавать желаемую позицию МР при ручном ДУ. Поэтому комбинированный режим, в котором управление может последовательно происходить как по скорости, так и по положению, позволит ЧО поочередно задавать желаемую скорость и положение МР в удаленной среде.

## 2.2 Комбинированный режим управления

В комбинированном режиме управления ЧО предоставляется возможность последовательно переключаться между управлением по скорости и управлением по положению [5]. Для этого ЗУ должно обладать некоторым двухпозиционным переключателем, который обеспечивает работы в двух режимах: скоростной режим ДУ и позиционный режим ДУ.

В скоростном режиме ЧО имеет удобную возможность остановить МР в некотором положении за счет наличия мертвой зоны в СК ЗУ. Для этого

необходимо перевести ЗУ в мертвую зону, заданную вокруг начала СК ЗУ. Однако в скоростном режиме управления у ЧО нет непосредственной возможности точно задавать или корректировать желаемое положение и ориентацию МР. Для обеспечения этой возможности необходимо управлять МР по положению, т. е. осуществлять ДУ в позиционном режиме. Таким образом, позиционный режим управления является более точным для управления МР. Недостатком позиционного управления является крайне высокая чувствительность контроллера робота к относительно небольшим приращениям положения ЗУ, вызванная необходимостью использовать большие значения коэффициентов масштабирования. В рассматриваемом комбинированном режиме управления ЧО самостоятельно принимает решение о том, какой из режимов (позиционный или скоростной) должен быть активирован в тот или иной момент времени. Скоростной режим управления удобен в случаях, когда необходимо осуществить быстрое перемещение робота на большое расстояние. Позиционный режим подходит, когда необходимо с достаточной точностью переместить МР в заданное положение в ограниченном пространстве.

Для корректного переключения между режимами управления необходимо обеспечить соответствующий сброс и перенос начала СК ЗУ. При каждом переключении необходимо восстанавливать новую СК ЗУ с началом в текущем положении ЗУ. При этом направление осей новой СК остается неизменным. Подробно алгоритм сброса и переноса СК ЗУ описан в [6].

## 3. Человеко-машинные интерфейсы в системах ДУ МР

В системе ДУ МР с комбинированным режимом управления для обеспечения выбора наиболее оптимального режима ЧО важно обладать достаточным набором информации о состоянии МР и удаленной среды. Передачу и отображение такой информации ЧО обеспечивают человеко-машинные интерфейсы (ЧМИ). Поэтому важной задачей является исследование взаимовлияния различных режимов управления и типов ЧМИ в системе ДУ МР. Под типами ЧМИ мы понимаем различные способы отображения информации.

### 3.1. Визуальная информация

В большинстве систем ДУ МР ЧО имеет возможность непосредственно наблюдать за роботом, либо следить за его работой с помощью видеосис-

тем, которые отображают некоторую визуальную информацию. Видеоинформация может быть представлена ЧО в двух видах: текстовом и графическом. Скорость, положение, ориентация, расстояние до объектов и т. д. удобно представлять в текстовом виде. С помощью графической информации удобно представлять интерактивную карту удаленного пространства, в которое помещен МР, а также изображение с видеокamer, установленных на МР.

### 3.2. Система отражения усилий

Для обеспечения надежного и безопасного ДУ МР применяют системы отражения усилий и активные ЗУ. Такие системы посредством воспроизведения соответствующих усилий на ЗУ позволяют отображать информацию о направлении и расстоянии до препятствий. При этом направление вектора воспроизводимой силы будет противоположно направлению от МР до препятствия, а амплитуда вектора силы будет обратно пропорциональна расстоянию до препятствия. Таким образом, система отражения усилия воспроизводит силу на ЗУ, действующую на руку ЧО и указывающую направление, позволяющее МР безопасно перемещаться в удаленном пространстве без столкновений с объектами этой среды. Описанная выше сила вычисляется по следующей формуле:

$$F_e = \begin{cases} \frac{k_e}{L}, & L < L_0; \\ 0, & L \geq L_0, \end{cases} \quad (5)$$

где  $k_e$  — коэффициент масштабирования;  $L$  — расстояние до препятствий;  $L_0$  — фиксированное минимальное расстояние до препятствия, при прохождении которого начинает воспроизводиться сила  $F_e$ .

Также в системах отражения усилий часто используют силы, стремящиеся вернуть ЗУ в начальное положение. Такая сила описывается следующим образом:

$$F_{init} = -k_{init}z_m, \quad (6)$$

где  $F_{init}$  — инициализирующая сила;  $k_{init}$  — коэффициент масштабирования. Такая сила полезна при скоростном режиме ДУ. Если ЧО прекращает управлять МР, то благодаря этой силе ЗУ автоматически возвращается в начальное нулевое положение, что означает полную остановку МР. Кроме того, согласно формулам (1) и (2) сила  $F_{init}$  пропорциональна скорости МР  $V$ , что означает, что сила  $F_{init}$  также отражает информацию о текущей скорости МР. Очевидно, что в позиционном режиме отражать силу  $F_{init}$  не имеет смысла. Таким образом, общая сила,

воспроизводимая на ЗУ, описывается как сумма двух сил:

$$F = F_e + iF_{init}, \quad (7)$$

где  $i = 0$  в позиционном режиме ДУ и  $i = 1$  — в скоростном режиме ДУ. При скоростном режиме управления, когда  $i = 1$ , теоретически возможно, что  $F_e = F_{init}$ , что приводит к нулевой результирующей силе (7). Это возможно только в случае, когда  $z_m = -k_e/k_{init}/L$ , что на практике маловероятно, и поэтому данный случай нами не рассматривается. В экспериментах, описанных далее, используются следующие значения коэффициентов:  $k_e = 0,5 \text{ Н} \cdot \text{м}$ ,  $k_{init} = 10 \text{ Н/м}$ .

## 4. Эксперимент

### 4.1. Экспериментальная установка

Для исследования влияния режимов управления и различных типов ЧМИ на качество выполнения задач при ДУ МР была разработана экспериментальная установка, и с ее помощью проведен ряд экспериментов. ЧО управлял МР посредством изменения положения активного ЗУ. Настольный манипулятор Phantom Premium 1.5A был использован в качестве активного ЗУ, две линейные степени свободы в горизонтальной плоскости — для управления линейной и угловой скоростями МР (рис. 1). С помощью двухпозиционного переключателя на рукоятке манипулятора переключали режимы управления. ЗУ было подключено к персональному компьютеру с управляющей программой, обеспечивающей формирование сигналов управления для МР. Алгоритм и структура управляющей программы подробно описаны в [6]. Для обмена управляющими и информационными сигналами между компьютером применяли TCP/IP протокол и беспроводную компьютерную сеть. В качестве МР была использована мобильная платформа Pioneer 3DX от компании Activmedia.

Для отображения текстовой и графической информации использовали видеомонитор и специально разработанную программу. С помощью текста отображали числовую информацию о состоянии МР, в графическом виде — видеосигналы с камер, установленных на МР. Инфракрасные датчики расстояния, установленные на корпусе МР, измеряли расстояние до объектов вокруг робота и передавали полученную информацию на управляющий компьютер. В свою очередь, компьютер формировал управляющие сигналы для активного ЗУ согласно формуле (5).

На рис. 2, а показан ЧО, управляющий ЗУ. На рис. 2, б показан МР с двумя видеокамерами. Первая камера установлена на небольшой мачте, что позволяло получать изображение общего вида МР и пространства вокруг него. Вторая камера установлена на передней части МР и направлена вниз непосредственно на область пространства перед МР и его передним бампером. Бампер использовали для осуществления простых манипуляций над объектами. На рис. 2, в показаны видеозображения с камер, которые ЧО видел на экране монитора.

В эксперименте по ДУ МР принимали участие пять человек. Перед экспериментом был проведен инструктаж, который включал в себя объяснение принципов скоростного, позиционного и комбинированного позиционно-скоростного режимов управления. Каждый участник дополнительно проводил по две тренировочные попытки ДУ МР для каждого режима управления, после чего участник приступал к настоящему эксперименту. Эксперимент проводили по три раза для каждого ЧО, при этом в отчет о результатах вносили средние арифметические значения измеренных показателей.

В экспериментах использовали следующие значения управляющих параметров:  $k_V = 5 \text{ с}^{-1}$ ,  $k_\omega = -0,5 \text{ }^\circ/\text{мм}/\text{с}$ ,  $k_S = -40$ ,  $k_A = -2 \text{ }^\circ/\text{мм}$  (для эксперимента, описанного в разделе 4.2). Для эксперимента, описанного в разделе 4.3, значения коэффициентов масштабирования  $k_S$  и  $k_A$  были выбраны меньше:  $-1,5$  и  $-0,25 \text{ }^\circ/\text{мм}$ , соответственно. Это позволяло осуществлять более точное ДУ МР. При этом была реализована возможность сброса СК ЗУ для переноса ее начала в новое положение, что позволяло избежать проблем при установлении соответствия между СК ЗУ и рабочей зоной МР. ПД-регуляторы использовали как для управления скоростью, так и для управления положением МР. Во всех экспериментах управление МР Pioneer 3DX осуществляли путем задания желаемой скорости. В скоростном режиме ДУ желаемую скорость МР вычисляли как функцию положения ЗУ. В позиционном режиме желаемую скорость МР вычисляли как функцию ошибки между желаемым и текущим положениями МР.

В эксперименте по позиционированию МР абсолютная линейная скорость была ограничена вели-

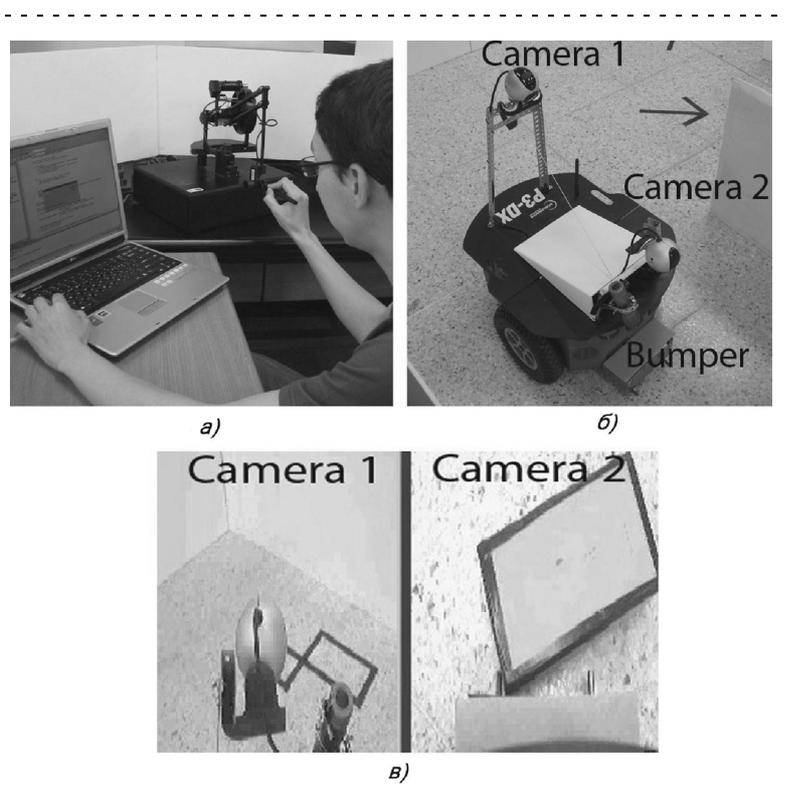


Рис. 2. ЧО управляет ЗУ (а); МР с видеокамерами (б); видеозображение, получаемое с видеокамер (в)

чиной 700 мм/с. В эксперименте по ДУ МР в среде с большим числом препятствий скорость не превышала 400 мм/с.

#### 4.2. Позиционирование МР

В этом разделе описан эксперимент по оценке качества позиционирования МР в зависимости от режима управления и типа ЧМИ. Под задачей позиционирования МР мы понимаем перемещение МР в заданное желаемое положение. Экспериментально исследовано, какой из описанных в разделе 2 режимов управления обеспечивает выполнение задачи за меньшее время, т. е. обладает большей производительностью. В эксперименте ЧО была поставлена задача прямолинейного перемещения МР на 6 м как можно более точно с минимальными временными затратами.

В первой серии экспериментов МР был помещен в среду без посторонних объектов и препятствий. В этом случае применялся ЧМИ без системы отражения усилий. Информацию о текущем положении МР отображали на экране управляющего компьютера в текстовом виде. В ходе эксперимента измеряли время, требуемое на выполнение задачи позиционирования. Результаты эксперимента, проведенного с одним ЧО, представлены на рис. 3:

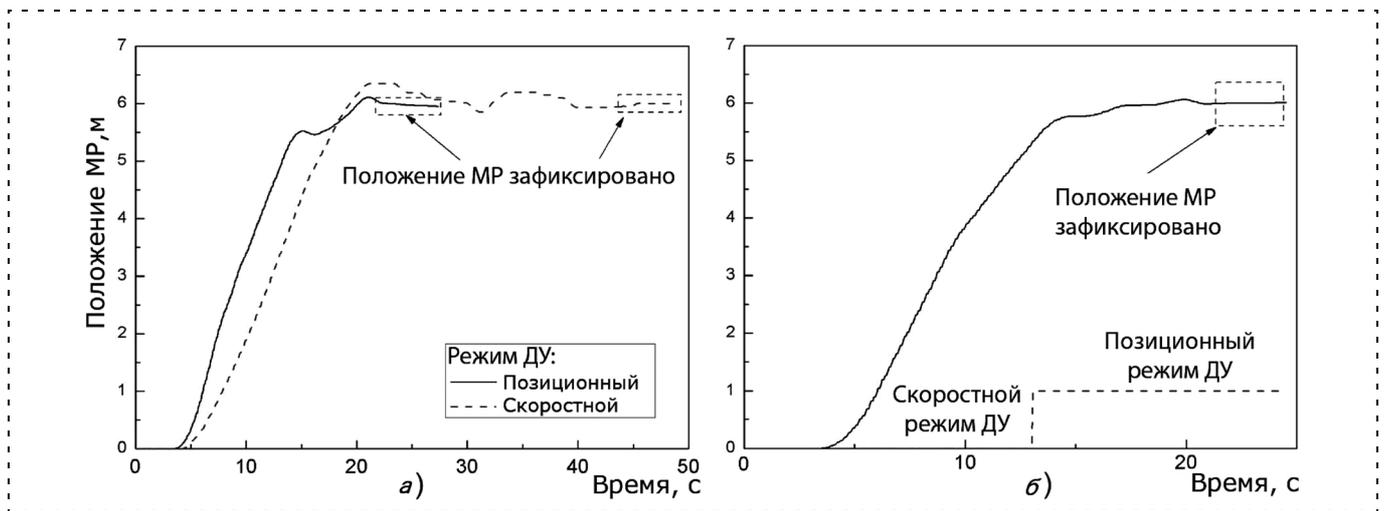


Рис. 3. Экспериментальные результаты позиционирования МР при использовании ЧМИ только с текстовым отображением информации

*a* — графики изменения положения МР при позиционном и скоростном режимах ДУ; *б* — график изменения положения МР при комбинированном позиционно-скоростном режиме управления.

Для выполнения задачи позиционирования в скоростном режиме ДУ потребовалось примерно 43 с. Сначала ЧО с помощью ЗУ задавал некоторое значение желаемой скорости, по мере приближения к цели ЧО приводил ЗУ в начальное нулевое положение и в итоге останавливал МР. В позиционном режиме управления потребовалось примерно 25 с для позиционирования робота. В этом случае ЧО мог непосредственно осуществить перемещение МР в заданную точку путем перевода ЗУ в соответствующее положение. Однако МР перемещался в желаемое положение с некоторой задержкой, связанной с большой инертностью МР.

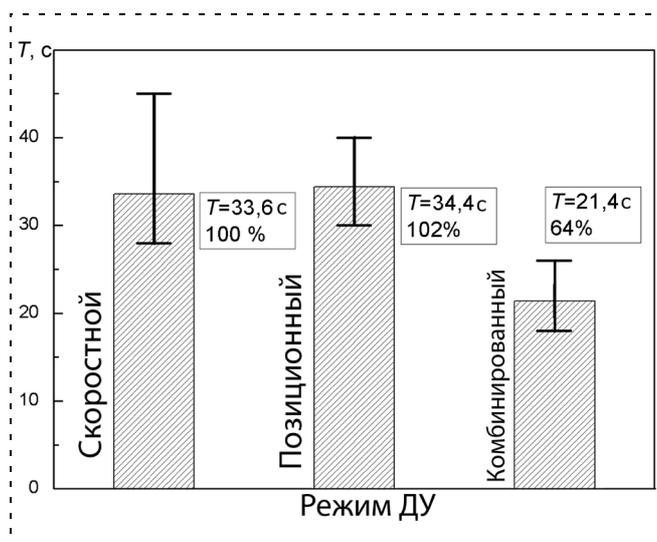


Рис. 4. Средние значения времени, требуемого для позиционирования МР

При комбинированном ДУ (рис. 3, *б*) сначала использовался скоростной режим управления, который обеспечил быстрое перемещение МР в желаемую зону, после чего был активирован позиционный режим управления. Переключение между режимами произошло примерно на 13 с. Позиционный режим позволил точно задать и зафиксировать положение МР. Совместное использование режимов позволило сократить временные затраты на выполнение задачи позиционирования.

На рис. 4 представлены средние результаты позиционирования МР, полученные в экспериментах с пятью различными ЧО\*. Среднее время, требуемое для выполнения задачи позиционирования, было наименьшим при комбинированном режиме управления. Применение комбинированного режима управления сократило временные затраты на 36 %.

На графиках на рис. 3 видно, что качество и точность позиционирования отличается в каждом из экспериментов. Для исследования влияния режима ДУ на точность позиционирования был проведен дополнительный эксперимент. ЧО должен был так же, как и в предыдущем случае, переместить МР на 6 м вперед, однако в этот раз на расстоянии 6,5 м от начального положения МР было установлено препятствие. Информация о препятствии отображалась ЧО с помощью системы отражения усилия. Было изучено влияние типа ЧМИ и режима ДУ на точность позиционирования МР. Для

\*На рис. 4 и далее на рис. 6 и 9 смысл вертикальных отрезков на диаграммах — разброс максимальных и минимальных результатов измерений, полученных при экспериментах с различными ЧО. Верхний и нижний концы отрезков соответствуют максимуму и минимуму измерений.

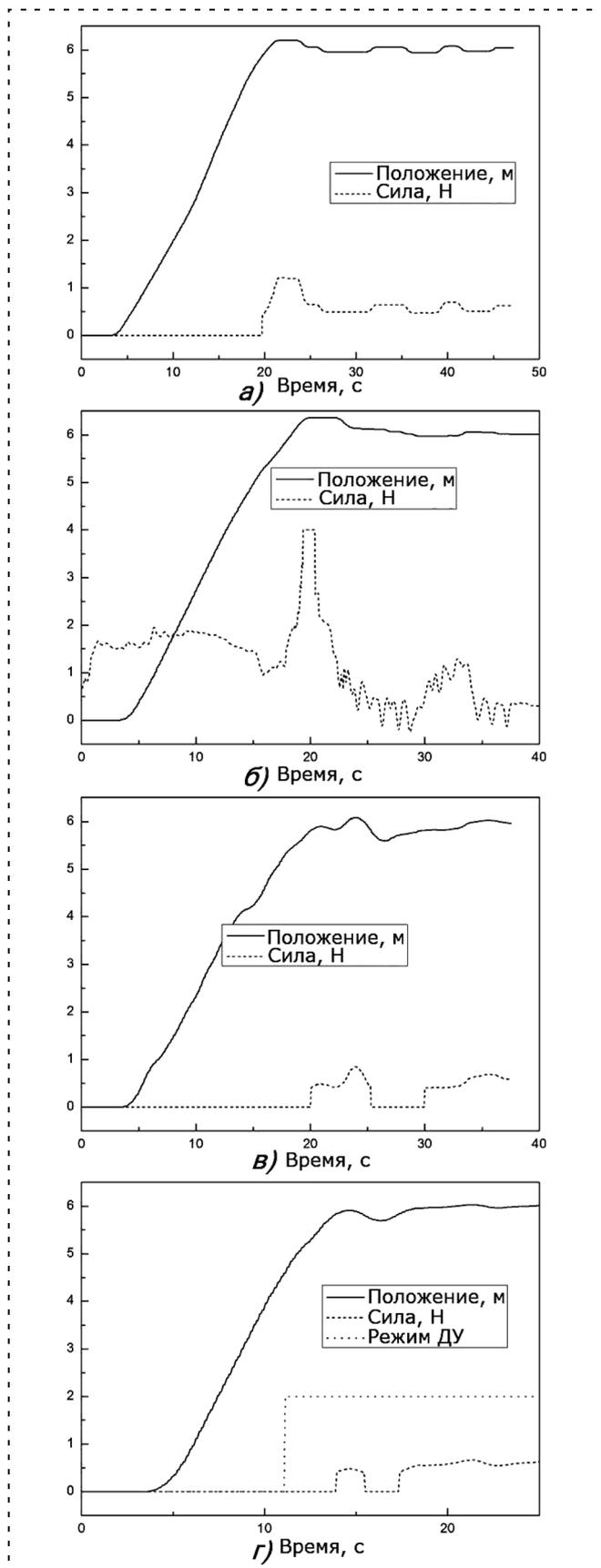


Рис. 5. Экспериментальные результаты позиционирования МР при использовании ЧМИ с текстовым отображением информации и с системой отражения усилий: а и б — скоростной режим ДУ; в — позиционный режим ДУ; г — комбинированный режим ДУ

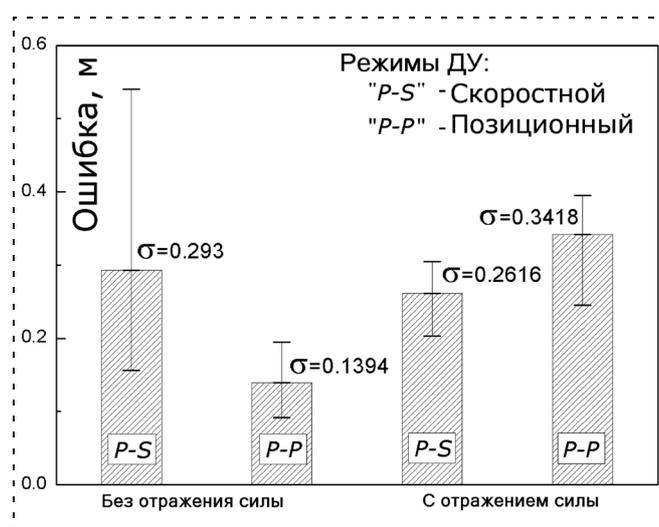


Рис. 6. Средние значения ошибки позиционирования МР

каждого эксперимента была посчитана усредненная ошибка:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_{des} - x_i)^2}, \quad (8)$$

где  $N$  — число измеряемых точек;  $x_{des}$  и  $x_i$  — желаемое и текущее положения МР, соответственно. Вычисленная таким образом усредненная ошибка дает возможность численно оценить точность и качество позиционирования. Результаты эксперимента с одним ЧО представлены на рис. 5. Средние результаты эксперимента для пяти ЧО представлены на рис. 6. Наименьшая ошибка позиционирования была достигнута при позиционном режиме ДУ без применения системы отражения усилий. Наибольшая ошибка была получена при позиционном ДУ с применением системы отражения усилий. При скоростном режиме ДУ наличие системы отражения усилий повысило точность, в то время как для позиционного режима ДУ наличие системы отражения усилий было критическим.

#### 4.3. ДУ МР в среде с большим числом препятствий

Для более полного и реалистичного исследования влияния режимов ДУ на точность и производительность МР был проведен эксперимент по ДУ МР в специально построенной удаленной среде. На рис. 7 схематически показана карта удаленной среды. Каждому ЧО была поставлена задача по перемещению МР из "Комнаты 1" в "Комнату 2", после чего было необходимо с помощью бампера МР осуществить перенос "Объекта 1" и "Объекта 2" в заранее определенные желаемые положения, кото-



Рис. 7. Карта удаленной среды и схема задания для эксперимента

рые были визуально отмечены на полу. На рис. 8 показан МР после выполнения задачи (рис. 8, а) и способ измерения точности позиционирования объектов (рис. 8, б). Сначала измеряли расстояния  $a$ ,  $b$ ,  $c$  и  $d$ , после чего вычисляли среднюю ошибку:

$$e = \frac{a + b + c + d}{4}. \quad (9)$$

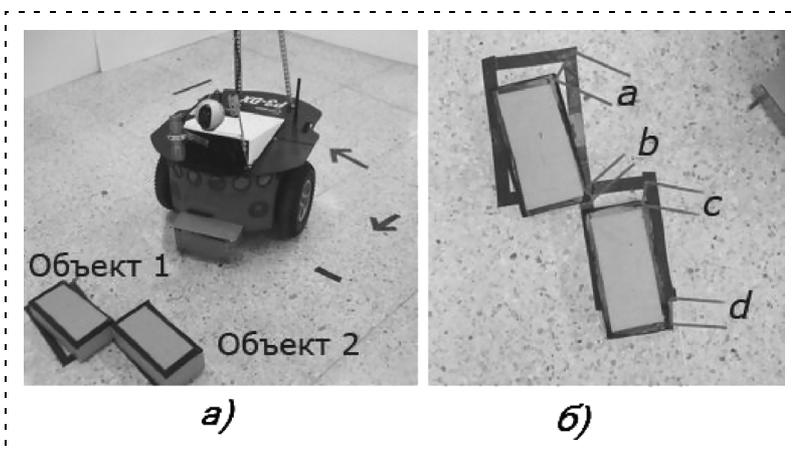


Рис. 8. МР после выполнения задачи (а) и схема измерения ошибки (б)

Ошибка позволяла численно оценить точность системы ДУ МР, а время, требуемое на выполнение задачи, позволяло оценить производительность системы.

## 5. Анализ результатов экспериментов

### 5.1. О роли текстовой информации

При ДУ МР на экране компьютера ЧО мог видеть значения положения и скорости МР. В скоростном режиме управления среднее время выполнения задачи составляло 33,6 с (см. рис. 4). В этом случае система отражения усилия не применялась, и поэтому ЧО не мог получать информацию о наличии возможных препятствий на пути робота. В целях безопасности ЧО не управлял МР на больших скоростях, вследствие чего МР двигался относительно медленно, и потребовалось больше времени на завершение позиционирования. Также важно отметить, что в скоростном режиме управления, несмотря на то, что ЧО мог отслеживать положение МР на экране монитора, было достаточно сложно остановить МР на требуемом расстоянии (см. рис. 3, а). В результате точность позиционирования при скоростном режиме ДУ с текстовым ЧМИ составила 0,293 м (см. рис. 6).

На рис. 3, а показан график изменения положения МР при позиционном режиме ДУ. В этом случае среднее время выполнения задачи составило 34,4 с (см. рис. 4). ЧО мог непосредственно управлять положением МР, в результате позиционирование МР было более точным. Средняя ошибка составила 0,1394 м (см. рис. 6). Максимальная точность была достигнута благодаря применению позиционного режима управления и отсутствию системы отражения усилий.

В последнем эксперименте с текстовым отображением информации применяли комбинированный режим управления (см. рис. 3, б). Для переключения от скоростного режима к позиционному ЧО с помощью текстовой индикации отслеживал положение МР. Как только робот находился вблизи желаемого положения, ЧО переключался к позиционному управлению. В этом случае отображение значения положения МР позволяло ЧО с достаточной точностью остановить робот в нужном месте. При этом временные затраты существенно сократились и в среднем составили 21,4 с (см. рис. 4).

## 5.2. О роли системы отражения усилий

В эксперименте по позиционированию МР системе отражения усилий применяли для передачи ЧО информации о наличии препятствий на пути робота. На рис. 5 показаны графики изменения сил, отражаемых на ЗУ. На рис. 5, а сила была вычислена по формуле (7), где параметр  $i = 0$ , на рис. 5, б — по формуле (7), где параметр  $i = 1$ , что означает, что сила дополнительно содержала информацию о скорости МР. В первом случае (см. рис. 5, а) наблюдались колебания положения МР при позиционировании, вызванные наличием препятствия вблизи МР. Во втором случае (см. рис. 5, б) колебания положения МР не были ярко выраженными благодаря силовому отражению информации о скорости МР. Дополнительное отображение информации о скорости МР с использованием системы отражения усилий повышает устойчивость системы ДУ МР при позиционировании в скоростном режиме управления. В результате точность ДУ повысилась, средняя ошибка позиционирования составила 0,2616 м (см. рис. 6).

Критичным было использование системы отражения усилий при позиционном режиме ДУ (см. рис. 5, в). По мере приближения МР к желаемому положению и препятствию на ЗУ воспроизводилась сила, предупреждающая ЧО о наличии постороннего объекта на пути МР. Большое значение коэффициента масштабирования  $k_S$  (см. (4)) являлось причиной высокой чувствительности МР к небольшим изменениям положения ЗУ. Поэтому усилия, воспроизводимые на ЗУ, вызывали колебания положения МР, что существенно снижало точность системы ДУ. Например, это видно на графике, изображенном на рис. 5, в на 25 с движения МР. Такое же снижение точности наблюдалось при комбинированном режиме управления (см. рис. 5, г). Средняя ошибка в этом случае была максимальной (см. рис. 6).

## 5.3. Влияние режима ДУ на производительность

Было изучено влияние режимов ДУ на производительность системы. Под производительностью системы ДУ МР мы понимаем скорость выполнения поставленной задачи. Поэтому в качестве показателя производительности было выбрано время, требуемое для завершения задачи. В эксперименте, описанном в разделе 4.3, для каждого ЧО было измерено время, за которое он завершал задачу навигации МР и манипуляции над объектами. Наименьшее время понадобилось при скоростном режиме ДУ. Все участники эксперимента успешно выпол-

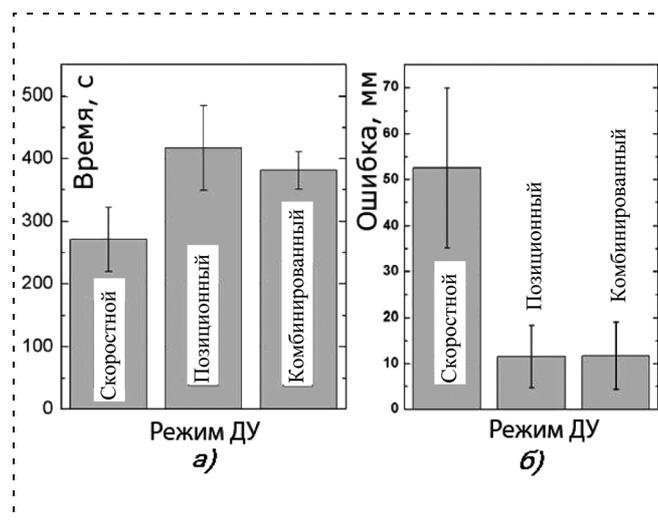


Рис. 9. Средние значения времени, требуемого для выполнения задачи (а); средние значения ошибки (б)

нили поставленную задачу. Среднее время составило 270 с (рис. 9, а). Больше времени потребовалось при позиционном и комбинированном режимах управления. В позиционном режиме управления ЧО последовательно задавал желаемое положение МР с помощью ЗУ. При этом из-за ограниченности рабочей зоны ЗУ ЧО приходилось осуществлять перевод ЗУ в начальное положение и сброс СК ЗУ. Выполнение этих операций занимало значительное время, поэтому общее требуемое время было относительно большим. Тем не менее, среднее значение требуемого времени в комбинированном режиме ДУ было меньше, чем в позиционном управлении (рис. 9, а). Это связано с тем, что в комбинированном режиме управления ЧО мог использовать управление по скорости для перемещения МР на большие расстояния (например, перемещение из комнаты 1 в комнату 2), что значительно ускорило выполнение задачи. Для более точного управления МР ЧО мог переключиться к позиционному управлению.

## 5.4. Влияние режима ДУ на точность

Кроме того, в эксперименте, описанном в разделе 4.3, для каждого ЧО была измерена точность позиционирования объектов 1 и 2. Максимальная ошибка возникала при скоростном режиме. Средняя ошибка для всех участников эксперимента превысила 50 мм (рис. 9, б). Существенно бо́льшая точность была достигнута при позиционном и комбинированном режимах ДУ. При позиционном управлении приращение положения ЗУ непосредственно соответствовало изменению положения МР. Таким образом, ЧО мог легко управлять положением МР,

что позволило добиться относительно высокой точности. То же самое можно сказать и о комбинированном режиме управления, так как ЧО имел возможность переключаться от скоростного режима управления к позиционному в случаях, когда было необходимо осуществлять точные манипуляции по перемещению объектов. Средняя ошибка при позиционном и комбинированном режимах управления составила 12 мм (рис. 9, б).

### 5.5. Компромисс между производительностью и точностью

По экспериментальным данным был проведен дисперсионный анализ и апостериорный тест Тьюки с критерием значимости, равным 4,51. Анализ показал существенные различия для измеренного времени и точности в экспериментах с позиционным и скоростным режимами управления и в экспериментах с комбинированным и скоростным режимами управления. Различия между измеренным временем и точностью в экспериментах с позиционным и комбинированным режимами управления статистически незначимы.

Результаты экспериментов и проведенного статистического анализа позволяют сделать следующие выводы. Применение комбинированного режима ДУ МР позволяет значительно повысить точность управления движением и в то же время понижает производительность системы. Согласно экспериментам при комбинированном режиме ошибки управления МР снизились на 400 %, в то время как временные затраты повысились на 30 %. На рис. 10

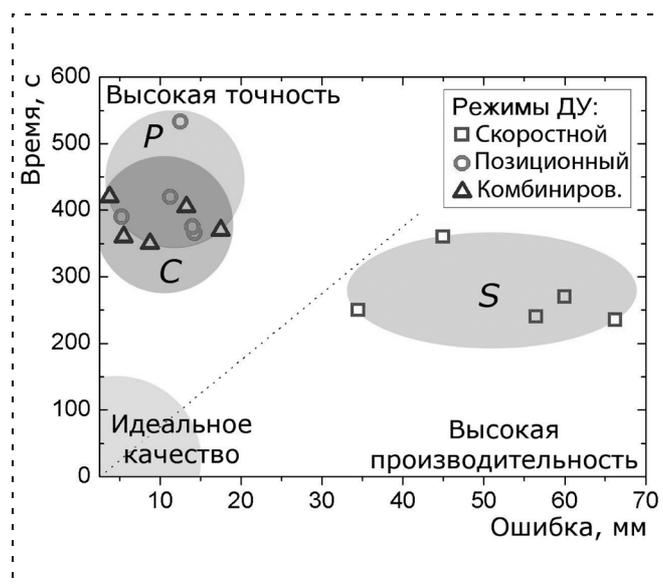


Рис. 10. Диаграмма зависимости точности управления от затраченного времени; обозначения режимов управления: *P* — позиционный, *S* — скоростной, *C* — комбинированный

показана диаграмма, на которой одновременно отмечены результаты измерения времени и ошибки для пяти ЧО в эксперименте, описанном в разделе 4.3. На диаграмме выделены три зоны, соответствующие трем режимам управления. Очевидно, что результаты, полученные при скоростном режиме ДУ, существенно отличаются от результатов при позиционном и комбинированном режимах ДУ.

### Заключение

Проведено экспериментальное исследование системы ДУ МР при различных режимах управления и типах ЧМИ и проанализировано влияние режимов ДУ на точность и производительность системы. Эксперименты показали, что текстовое отображение информации удобно применять для прямого и точного управления положением МР. Системы отражения усилия делают ДУ безопасным, предотвращая возможные столкновения МР с объектами удаленной среды. Однако применение систем отражения усилий в некоторых случаях может приводить к снижению точности ДУ МР. Это особенно важно при позиционном режиме управления МР, находящемся в среде с большим числом посторонних объектов.

Традиционный для ДУ МР скоростной режим обеспечил наибольшую производительность, в то время как предложенный комбинированный режим управления позволил существенно повысить точность управления положением МР. Предложенный комбинированный режим управления может применяться для ДУ МР как в больших, так и в ограниченных удаленных пространствах, при этом обеспечивая высокую точность движения при сохранении относительно высокой скорости выполнения поставленных задач.

### Список литературы

1. Кулешов В. С., Лакота Н. А. Дистанционно управляемые роботы и манипуляторы. Москва: Машиностроение, 1986.
2. Lee S., Sukhatme G. S., Kim G. J., Park C.-M. Haptic control of a mobile robot: a user study // Proceedings of IEEE/RSJ IROS 2002, Lausanne, Switzerland, October 2002.
3. Diolaiti N., Melchiorri C. Haptic teleoperation of a mobile robot // Proc. of the 7th IFAC symposium of robot control, 2003. P. 2798—2805.
4. Nielsen C. W., Goodrich M. A., Ricks R. W. Ecological interfaces for improving mobile robot teleoperation // IEEE Trans Robot. 2007; 23(5): 927—941.
5. Farkhatdinov I., Ryu J.-H. Hybrid position—position and position—speed command strategy for the bilateral teleoperation of a mobile robot // International Conference on Control, Automation and Systems 2007, COEX, Seoul, 17—20 October 2007.
6. Farkhatdinov I., Ryu J.-H. Switching of control signals in teleoperation systems: formalization and application // Proc. of the 2008 IEEE/ASME international conference on advanced intelligent mechatronics, Xi'an, 2—5 July 2008.